基于热能自组织成电能的无需冷源的热电子能量转换器

王正良

（浙江万里学院应用物理研究所 ，宁波，315101）

摘要：无论是热机，还是热电直接转换装置都必需有一个冷源,如果热能能够自组织成电能就可以打破这一常规。研究发现固体发射极的表面势垒通过耗散被发射电子的动能产生一个负熵流，固体发射极的热电子发射是一个耗散结构，固体发射极失去电子呈正电性而外界得到电子呈负电性从而自组织成宏观上有序的电偶层。为了将这一电偶层的电场能量释放到电路中，本文以固体发射极为热电子发射极同时以不存在表面势垒的不发射电子的金属熔融液为集电极；构建发射极和集电极处于同一温度的热电子能量转换实验装置；实验结果有稳定的电压和电流输出，实现了基于自组织现象的无需冷源的热电直接转换新方式，这一装置对高效、简洁、安全的实施热电直接转换有广阔的应用前景。

关键词：热电子发射；自组织现象；无需冷源；热电子能量转换器；

分类号： TM915

Thermionic Energy Converter without Cold Reservoir Based on Heat Energy Self-organizes into Electric Energy

Zhengliang Wang

Institute of Applied Physics, Zhejiang Wanli University, 1519 Shengmo Road, Ningbo 315101, China

E-mail: wzl111@zwu.edu.cn

Abstract: Both the heat engine and the thermoelectric converter require a cold reservoir, but the heat energy organization into electricity energy can break this routine. It is found that the solid emitter thermionic emission forms a dissipative structure. The solid emitter appears electropositive by losing electrons and the surroundings appear negative by gaining electrons, which self-organizes into an ordered electric double layer in macro scale. To release this electric field energy from electric double layer into circuit, in this experiment, molten metal with none surface potential barrier and no thermionic emission is used as a collector while the solid emitter thermionic emission, the solid emitter and the molten metal collector maintain the same temperature, it is found that the voltage and current output are stable. A new method is provided to convert heat energy to electric energy directly without cold reservoir based on self-organization, this thermionic energy converter can be used widely in the future.

Keywords: Thermionic emission; Self-organization; A cold reservoir; Thermionic energy converter;

1、引言

在平衡态热力学中，孤立系统中无序的热能不会自发转换成有序的机械能或电能，能量的转换在宏观过程中具有方向性，无论是热机，还是热电直接转换装置都有一个热源和一个冷源。工作原理遵循热力学第二定律，热电转换效率遵循卡诺定理，单一热源的热机和热电转换都是不可能实现的第二类永动机[1]。

但在非平衡态热力学中，Prigogine 把那种在开放和远离平衡的条件下、在与外界环境交换物质和能量的过程中通过能量耗散和内部的非线性动力学机制来形成和维持的宏观时空有序结构称为“耗散结构”（Dissipative structure），这种有序结构的建立是这一开放系

统自身发展起来的，称为自组织现象[2]。参照激光器可以利用组组织现象将无序的自然光自组织成有序激光输出[3]。本文通过研究固体发射极的热电子发射寻找无序热能组织成有序电能的自组织现象，从而建立起基于自组织现象的无需冷源的热电直接转换新方式。

2 理论分析

2.1 固体发射极的热电子发射与耗散结构

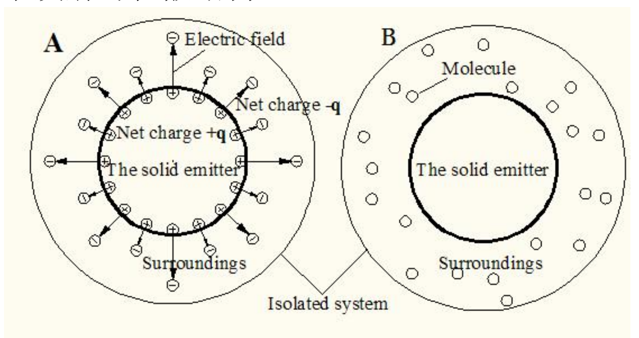


图 1：电子与分子热运动对比图，(A)孤立系统中固体发射极的热电子发射示意图，(B) 孤立系统中固体发射极的分子蒸发示意图

如图 1：电子与分子热运动对比图，通过对比更容易认识电子的热运动有别于分子的热运动特性。因固体发射极内电子受到库仑力的合力为 0，电子热运动等同于理想气体的分子热运动。固体发射极表面的电子因所受不对称库仑力的作用从而构成固体发射极的表面势垒，固体发射极的表面逸出功为的φ。

如图 1（A）所示：在一个足够高温度的孤立系统中，固体发射极内有一部分电子的动能足够克服固体发射极表面逸出功发射到外界从而使固体发射极内的电子成为一个开放系统。开放系统的熵的变化可以分成两部分：一部分是由固体发射极和外界相互作用引起的，即热电子发射过程引起的，这一部分熵的变化叫做熵流项，用 dS_e 表示；另一部分是由固体发射极体系内部的电子热运动不可逆过程产生的，这一部分熵的变化叫做熵产生项，用 dS_i 表示。

在热电子发射过程中，设固体发射极 A 的一个电子吸收了一无限小的热量 dQ 由固体发射极 A 通过发射传递到外界 B，由于 dQ 无限小，可以认为固体发射极 A 和外界 B 的温度不变，都为温度 T。

根据熵增原理

$$dS_i \geq 0 \tag{1}$$

固体发射极 A 的熵流为：

$$dS_{eA} = \frac{-dQ}{T} \tag{2}$$

外界 B 的熵流为：

$$dS_{eB} = \frac{dQ-\varphi}{T} \tag{3}$$

电子系统的总熵流为：

$$dS_e = dS_{eA} + dS_{eB} = \frac{-dQ}{T} + \frac{dQ-\varphi}{T} = \frac{-\varphi}{T} \tag{4}$$

则：

$$d_eS < 0 \tag{5}$$

如果

$$|dS_e| > dS_i \tag{6}$$

电子系统的总熵为：

$$ds = ds_i + ds_e < 0 \tag{7}$$

所以，从（6）和（7）得知，对于开放的电子系统，只要维持一个足够大的负熵流，系统就可以维持某种有序状态。$-\varphi/T$ 这一负熵流在无序到有序的自发过程中起到关键作用。热电子的动能只有大于固体发射极表面的逸出功才能被固体发射极表面势垒选择性地发射，固体发射极的表面势垒类似“麦克斯韦妖”，“麦克斯韦妖”耗散每个被发射电子的能量值等于固体发射极表面逸出功φ。而图 1（B）的麦克斯韦妖无法消耗分子的动能也就无法形成耗散结构。所以固体发射极的热电子发射符合耗散结构条件之一。

如图 1 所示：被发射的电子和被蒸发的分子脱离固体发射极表面的速率都是遵循麦克斯韦速率分布规律。因为库仑力是远程力，分子力是短程力，库仑力作用的效果远远超过分子力。图 1(B)外界中的蒸汽分子做无规则的热运动，均匀分布于整个外界，蒸汽分子处于平衡态。而图 1(A)外界中的电子越靠近固体发射极，电子密度越高，外界的电子系统呈电子云状态，这时电子的热运动远离平衡态，所以固体发射极的热电子发射符合耗散结构的条件之二。

图 1(B)外界中的蒸汽分子受到固体发射极的万有引力作用可以忽略不计，蒸汽分子与固体发射极不存在相互作用。图 1(A)电子因热运动不断地被固体发射极发射到外界，外界的电子因受到库仑力的作用不断地从外界返回到固体发射极，所以,非线性的库仑力的反馈作用使得电子的热运动向着复杂和有序的方向发展。所以固体发射极的热电子发射符合耗散结构的条件之三。

总上所述，固体发射极热电子发射符合耗散结构理论，是自然界中的一种自组织现象。

2.2. 宏观有序的结构

如图 1(A)所示，在热电子发射过程中，固体发射极失去电子的净电荷为$+q$，外界得到电子的净电荷为$-q$；形成一个宏观上的电偶层，类似于化学电池中中正极的电偶层，电偶层的电场方向从固体发射极指向外界，所以固体发射极的热电子发射自发形成的宏观有序结构就是电偶层,固体发射极的热电子发射过程是将无序热能自组织成有序电场能的过程。只要超过某一临界温度固体发射极就会发射电子，所以固体发射极无需冷源就可以将热能自组织成电能。

2.3. 热能自组织成电能的效率

固体发射极内电子热运动符合气体分子动理论,一个电子吸收的热能 Q 表现为电子的平动动能为 E_k，κ是玻耳兹曼常量，电子热运动的平均平动动能为

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2}\kappa T \tag{8}$$

取一个系数α(α>3/2),可假设一个被发射电子的动能为;

$$E_k = \alpha\kappa T \tag{9}$$

电偶极子的电场能量是 W_e,一个被发射的电子热能自组织成电场能的效率η：

$$\eta = \frac{W_e}{Q} = \frac{E_k - \varphi}{Q} = \frac{\alpha\kappa T - \varphi}{\alpha\kappa T} = 1 - \frac{\varphi}{\alpha\kappa T} \tag{10}$$

从（10）式可知，因为温度 T 无限大或φ为 0 是不可能的，且只有温度 T 足够大η才能有效，所以固体发射极不可能将全部热能自组织成电能，也不是所有温度下的热能都可以自组织成电能。所以无需冷源的固体发射极通过热电子发射将热能自组织成电能不是第二类永动

机，而是热力学第二定律在非平衡态热力学中的应用和发展，

固体发射极可以看作是一个无需冷源的热电子能量发生器，为了将这一电偶层中的电场能量释放到电路中，必须有一个在同样高温下不发射电子的集电极连接外界，金属熔融液可以满足这一条件。

这些为研制无需冷源的热电直接转换实验装置提供了理论基础。

3. 实验

3. 1. 实验装置

如图 2（A）实验装置的照片，（B）是实验装置结构示意图：将直径 5.8mm×高度 20mm 的钨电极装入内径 6mm×壁厚 0.5 mm×高度 40 mm 的底部封闭的陶瓷管，放置到刚玉坩埚中，再用铜粒填充刚玉坩埚，钼丝外套绝缘陶瓷管后作为导线。

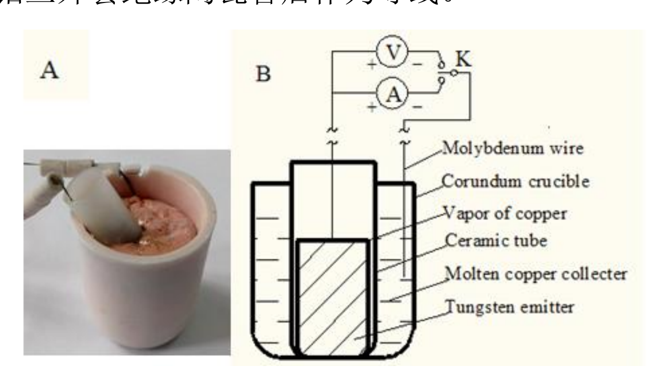


图 2：实验装置：(A) 实验装置的照片, (B) 实验装置结构示意图：

实验装置中的电子发射极是钨（W>99.5%），表面电子逸出功 4.55ev；电子集电极是铜熔融液（Cu>99.95%）；导线是钼丝（Mo>99.5%），铜、钨、钼之间可排除合金化反应可能产生的电动势。将高温端的发射极和集电极连接到常温端的电流表和电压表所使用的导线为同一材质的钼线以排除塞贝克效应可能产生的电动势[3]。

实验采用在高压钠灯中使用的α-Al_2O_3透明陶瓷管（α-Al_2O_3>99.7%），为陶瓷隔膜，陶瓷晶粒间孔隙（<0.1nm）小于钨和铜的原子直径，但大于电子直径。在高温条件下既绝缘隔离发射极和集电极，保持发射极和集电极微小间距，又能让发射极发射的电子扩散通过到达集电极，类似于化学电池中的隔膜。坩埚为刚玉坩埚（α-Al_2O_3>97%）；可以排除铜、钨与α-Al_2O_3之间产生化学反应可能产生的电动势。

在钨电极和陶瓷管之间有 0.2mm 左右的间隙，如果间隙填充碱金属蒸汽可显著降低发射极的逸出功，并消除空间电荷的积累[4]，但密封较困难。考虑到铜和钨的饱和蒸汽压相差很大，本文采用集电极蒸发的铜蒸汽自然填充间隙，便于简化实验。

3. 2. 实验方法

真空管式炉的最高加热温度 1973K，温度控制精度±0.5K，恒温区长度 20mm，刚玉管（α-Al_2O_3>97%）直径 60 mm；真空泵的极限压强为 4×10^{-4}Pa。在 1773K 时炉管密封系统的漏气率<0.15×10^{-5}Pa.l/s。排除空气渗漏可能产生的化学反应的电动势；

将热电子能量转换实验装置放入真空管式炉的恒温区，确保试验装置温度均匀。在加热过程中真空泵持续抽气以排除炉管中的气体，加热至铜熔化的 1357K 时，炉管中的真空度为 4×10^{-4}Pa。而后关闭真空泵，使铜熔融液蒸发的铜蒸汽填充钨棒和陶瓷管之间的间隙，这时炉管常温段的气压为 2×10^{3}Pa 左右直至加热至 1773K。电流表内阻 10Ω，测量精度±0.1μA。电压表内阻 10MΩ，测量精度±0.1mv。

4. 实验结果与讨论

4.1：电压和电流与温度的关系

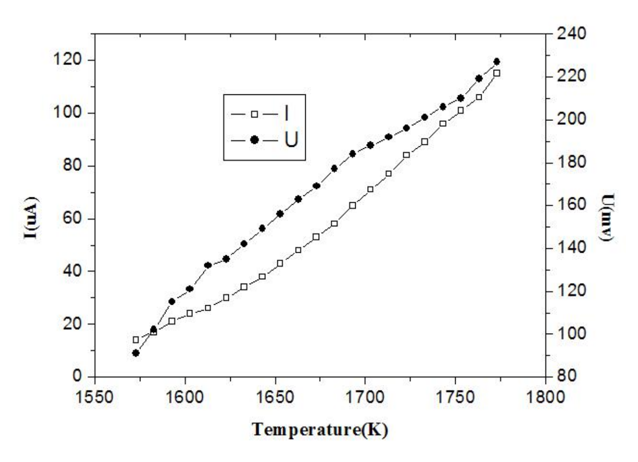


图 3：电流和电压与温度的关系图。

电流采用短路直接测量,电压采用开路直接测量。从 1573K 到 1773K 的温度区间，电流和电压值每隔温度 10K 测量记录一次，每个测量点保温 5 分钟，确保试验装置温度均匀及电压和电流稳定。图 3 是实验测得的电流和电压与温度的关系图。实验中的每个温度点都有相应的电压和电流，电压值和电流值随着温度的增高而增大,电压值从 91mv 增加到 227mv；电流值从 14μA 增加到 115μA.可以排除实验材料的晶相结构变化可能产生的电动势，实验装置有稳定的直流电压和直流电流输出，钨棒为正极，铜熔融液为负极，电路输出的是直流电；切断真空管式炉的电源，电路中还是有电流和电压；可以排除热电子能量转换器在真空管式炉中可能产生的感应电动势。所以实验证明无需冷源热能可以直接转换成电能。

4.2 电压和电流与时间的关系

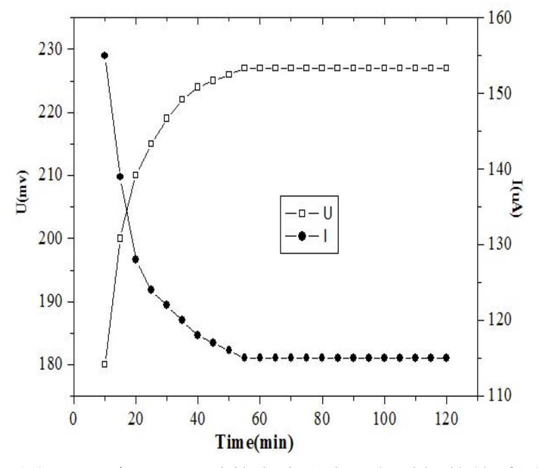


图 4：温度 1773K 时的电流和电压与时间的关系图。

图 4 是热电子能量转换器在温度 1773K 不变情况下测得的电流和电压与时间的关系图。电流从 155μA 很快趋向于一个较小的稳定值 115μA，类似电容的放电过程。电压从 180mv 很快趋向于一个较大的稳定的值 227mv，类似电容的充电过程。这个图类似直流电路中电阻电容串联的电路[5]。这里透明陶瓷管的绝缘性起到了电容中的电介质的作用,这与实验装置的电容结构特征相符合，同时透明陶瓷管让电子扩散通过，形成很大的电阻，致使输出的电压和电流较小。

电流不可能依靠陶瓷的电子传输,必有电荷穿过陶瓷隔膜，依据回路中的电流方向，要么是钨棒发射的电子穿过陶瓷隔膜到达铜熔融液，要么是铜离子穿过陶瓷隔膜到达钨电极。铜熔融液不可能在此温度下电离，铜原子不可能穿过高纯度的三氧化铝陶瓷变成铜离子，所以推断电路中的电流来自于钨电极发射的热电子。

在排除实验无关的电动势干扰下，实验装置处于管式炉的恒温区持续 2 小时确保实验装置温度均匀，实验仍有有稳定的电压和电流输出。

所以实验再次证明无需冷源热能可以直接转换成电能。

4.3 三个能量转换装置的对比分析

本实验的热电子能量转换器处于高温热源的发射极发射电子，处于同一高温热源的集电极因是金属熔融液没有表面势垒而不发射电子。

光电管可将光能直接转换成电能。处在同样光照下的发射极发射电子，集电极因逸出功较大而不发射电子[7]

传统的已实际应用的热电子能量转换器,处于高温热源的发射极发射电子，处于低温热源的固体发射极集电极因温度低不发射电子[8]。

对比以上三个装置，集电极被采用不同的方法使其不发射电子，集电极的作用都只是将电能释放到电路中。所以无需冷源的热电子能量转换是可行的。

4.4 推论与猜想

如图 5（A），在固体的热电子发射过程中，电子吸收热量不断地从固体发射极发射到外界，又受到库仑力作用不断地从外界回到固体发射极，电子无序热运动与有序电运动循环存在于固体与外界之间。如图 5（B）：若将实验装置中的钼丝和陶瓷隔膜去掉，固体发射的电子具有初动能，向不发射电子的金属熔融液集电极移动，在回路中产生相应的电流。揭示了在高温条件下固体与熔融液之间可能存在电流循环的物理效应。

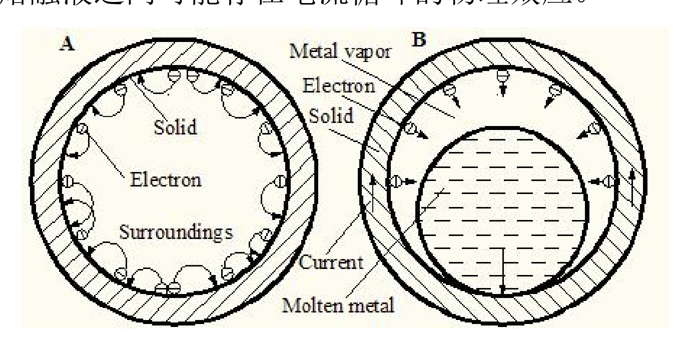


图 5：电子循环和电流循环对比图（A)：电子在固体和外界之间循环的示意图，(B)：电流在固体与金属熔液之间循环示意图

猜想：无需冷源的热电子能量转换装置是否可以将取之不尽的地球火山熔岩的热能直接转换为电能？固体发射极和熔岩组成的地球类似于图 5（B）的结构，是否可以用固体与熔融液之间存在的电流循环的物理效应解释地球磁场的形成机理？

5. 结论

用非平衡态热力学研究固体发射极的热电子发射过程,揭示了固体发射极的热电子发射是一种耗散结构,固体发射极通过热电子发射将热能自组织成电能。实验以钨电极为热电子发射极，以金属铜熔融液为集电极，实现了基于自组织现象的无需冷源的热电直接转换新方式。

参考文献:

【1】 马文蔚主编 .物理学教程，高等教育出版社，2002.7。-193

【2】 李如生编著，非平衡态热力学和耗散结构，清华大学出版社，1986.4-45

【3】 王国栋主编 .大学物理学，高等教育出版社，2007.12。-189

【4】 姜忠良、陈秀云编著，温度的测量与控制，清华大学出版社，2005.8-63

【5】 J. B. Cui, J. Ristein, and L. Ley, Phys. Rev. Lett. 81, 429 (1998)
【6】 蒋和乾主编，电工学，高等教育出版社，1986.10 -37
【7】 习岗主编，大学物理基础教程，高等教育出版社，2008.7。-141
【8】 Ned S. Rasor, Thermionic Energy Conversion Plasmas, IEEE transaction on plasma science vol. 19, no. 6, december1991

作者贡献声明

王正良完成全部工作。